

УДК: 534.13

OECD: 2.03 PU

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.006

Вибродемпфирование подкрепленной пластины

В.Ю. Кирпичников¹, А.В. Кудяев^{2*}, А.Ю. Олейников³

¹Д.т.н., профессор, ^{2,3}К.т.н., доцент

^{1,2,3}Кафедра «Техносферная безопасность и вычислительная механика», Балтийский Государственный Технический Университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова

Аннотация

Объектом исследования является подкрепленная пластина, для которой выполнено экспериментальное определение эффективностей уменьшения вибрации и шумоизлучения, установленным на ее внешнюю поверхность резонансным пластинчатым вибропоглопителем с нанесенным на него армированным вибропоглощающим покрытием на основе полимерной пленки. Представлены узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии и при наличии резонансных пластинчатых вибропоглопителей с армирующим слоем покрытия. Выявлены зависимости эффективности малогабаритного пластинчатого вибропоглопителя от толщины армирующего слоя покрытия.

Ключевые слова: пластина, вибрация, диссипативный слой, шумоизлучение, вибропоглощающее покрытие, эффективность, резонансная частота

Vibration damping of a reinforced plate

V. Yu. Kirpichnikov¹, A.V. Kudaev^{2*}, A. Yu. Oleinikov³

¹D.Sc., Professor, ^{2,3}Ph.D., Associate Professor

^{1,2,3}Department 'Technosphere Safety and Computational Mechanics', Baltic State Technical University the 'Voenmeh'

Abstract

The object of this study is a reinforced plate, for which the vibration and noise reduction efficiency was experimentally determined using a resonant plate vibration absorber mounted on its outer surface with a reinforced vibration-absorbing coating based on a polymer film. Narrowband spectra of the plate's input vibration excitability are presented with and without resonant plate vibration absorbers with a reinforcing coating layer. The dependence of the effectiveness of a small-sized plate vibration absorber on the thickness of the reinforcing coating layer is determined.

Keywords: plate, vibration, dissipative layer, noise emission, vibration-absorbing coating, efficiency, resonant frequency

*E-mail: ksiombarg1@yandex.ru (Кудяев А.В.)

Введение

Корпусные и внутрикорпусные конструкции транспортных средств и сооружений различного функционального назначения выполняют, как правило, в виде плоских или имеющих кривизну подкрепленных пластин. Элементы подкрепляющего, обычно перекрестного, набора таких пластин оказывают определяющее влияние как на уровни вибровозбудимости и шумоизлучения, так и на значения резонансных частот изгибных колебаний конструкций и их элементов.

При этом наибольшее негативное влияние на окружающую среду и обслуживающий персонал часто оказывают низкочастотные тональные (дискретные) составляющие (далее ДС) в спектрах вибрации и шума, особенно ДС на низшей резонансной частоте f_{11} изгибных колебаний подкрепленной пластины в целом с формой, имеющей одну полуволну в направлении кромок. Снижение уровней ДС на указанной f_{11} и других низших резонансных частотах, из-за малой эффективности существующих вибропоглощающих покрытий даже при их большой (до 50%) относительной массе, представляет значительные трудности [1], [2].

Приоритетным направлением улучшения акустических характеристик инженерных подкрепленных пластин является разработка с последующим практическим применением малогабаритных и высокоэффективных на низких частотах средств вибродемпфирования

Одним из таких средств являются резонирующие (далее резонансные) пластинчатые вибропоглотители (РПВ), в конструкцию которых входят закрепленная с зазором от демпфируемой конструкции металлическая (далее основная) пластинка. На одну или обе ее поверхности наносится армированное вибропоглощающее покрытие (АВП) с диссипативным слоем в виде полимерной пленки из поливинилацетата и с более тонкой, чем основная, пластинкой из металла в качестве армирующего слоя. Сравнивая поливинилацетат с другими существующими материалами, можно отметить значительные (коэффициент η от 1 до 3) потери колебательной энергии в диапазоне рабочих температур [3].

Функциональность описанных РПВ обусловлена интенсивным поглощением ими колебательной энергии, поступающей от демпфируемой конструкции на резонансной частоте f_p (например, f_{11}) при настройке на нее низшей резонансной частоты f_1 изгибных колебаний вибропоглотителя.

Высокая вибродемпфирующая эффективность подобных малогабаритных РПВ с одним (в зоне геометрического центра основной пластинки) или двумя (у коротких кромок) механическими соединениями при установке на однородные (без подкреплений) пластины подтверждена результатами экспериментальных исследований, которые содержатся, например, в работах [4], [5].

Экспериментальные исследования уменьшения уровней низкочастотной вибрации и шумоизлучения подкрепленных пластин с помощью описанных малогабаритных РПВ на основе полимерной пленки из поливинилацетата до настоящего времени не проводились.

Основной целью настоящей работы являлось натурное определение влияния толщины армирующего слоя вибропоглощающего покрытия описанного РПВ с одноточечным соединением на эффективность уменьшения уровней ДС на частоте низшего резонансного максимума изгибных колебаний находящейся в воздухе модели типовой подкрепленной пластины.

1 Описание модели подкрепленной пластины и вибропоглотителя

Модель демпфируемой подкрепленной пластины имела размеры в плане 1,59×1,09 м и толщину 4 мм. Подкрепление пластины было выполнено в виде перекрестного набора, содержащего пять подкреплений (ребер жесткости), ориентированных вдоль ее длинных кромок, и пятнадцать ребер жесткости, параллельных коротким кромкам. Высота первых равнялась – 80 мм, а вторых – 40 мм. Толщина всех элементов набора в форме однородных полос составляла 2 мм. Расстояние между более высокими ребрами жесткости равнялось ~160 мм, а между более низкими – примерно 100 мм.

Фото пластины с установленным на нее малогабаритным резонансным вибропоглотителем изображено на рисунке 1.

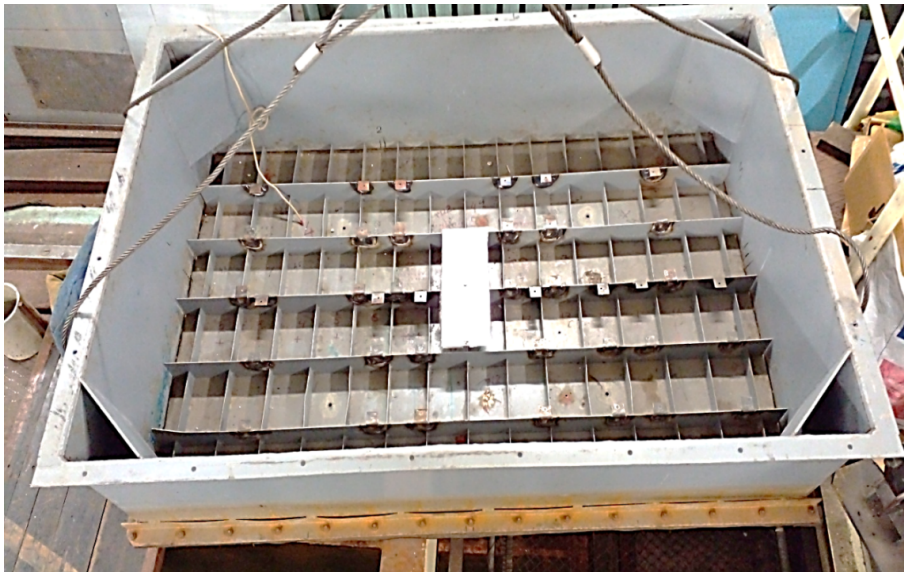


Рисунок 1 – Фото модели подкрепленной пластины

Кромки пластины с помощью болтовых соединений были закреплены к коробу прямоугольной формы, моделирующему участки соседних с пластиной конструкций.

Испытанные РПВ содержали основную стальную пластинку и установленное на нее армированное вибропоглощающее покрытие на основе полимерной пленки марки ВПС-2,5 из поливинилацетата толщиной 0,5 мм.

Крепление основной пластинки РПВ к демпфируемой пластине осуществлялось с помощью специального кронштейна, установленного на кромке среднего высокого ребра жесткости над его пересечением с ребром жесткости, имеющим меньшую высоту. Геометрические центры (ГЦ) пластины и РПВ находились на одной линии, перпендикулярной их параллельным поверхностям.

2 Вибрационные характеристики подкрепленной пластины и вибропоглотителя

В качестве исследуемой вибрационной характеристики подкрепленной пластины был выбран частотный спектр ее входной вибровозбудимости, под которой подразумевается выраженный в дБ уровень виброускорения

$$A/F = 20 \lg(AF_0/\alpha_0 F), \text{ дБ}, \quad (1)$$

где A , м/с² – уровень виброускорения в месте возбуждения силой, F , Н;

$\alpha_0 = 10^{-6} \text{ м/с}^2$ – пороговое значение виброускорения; $F_0 = 1 \text{ Н}$), измеренного в зоне геометрического центра пластины у пересечения элементов подкрепляющего набора. Возбуждение пластины осуществлялось с использованием вибромолотка с датчиком силы.

В приведенном на рисунке 2 (кривая 1) низкочастотном спектре A/F при отсутствии РПВ наблюдается ряд максимумов; наиболее заметные зарегистрированы на частотах 95,8; 360,5 и 388,5 Гц. Измерения показали, что указанные частоты совпадают с собственными частотами первых форм изгибных колебаний всей подкрепленной пластины.

Коэффициент потерь η колебательной энергии в пластине на указанных частотах, определенный по формуле $\Delta f_p/f_p$ (Δf_p – ширина резонансного максимума на уровне -3 дБ от его наибольшего значения), оказался практически одинаковым и равным примерно 0,014.

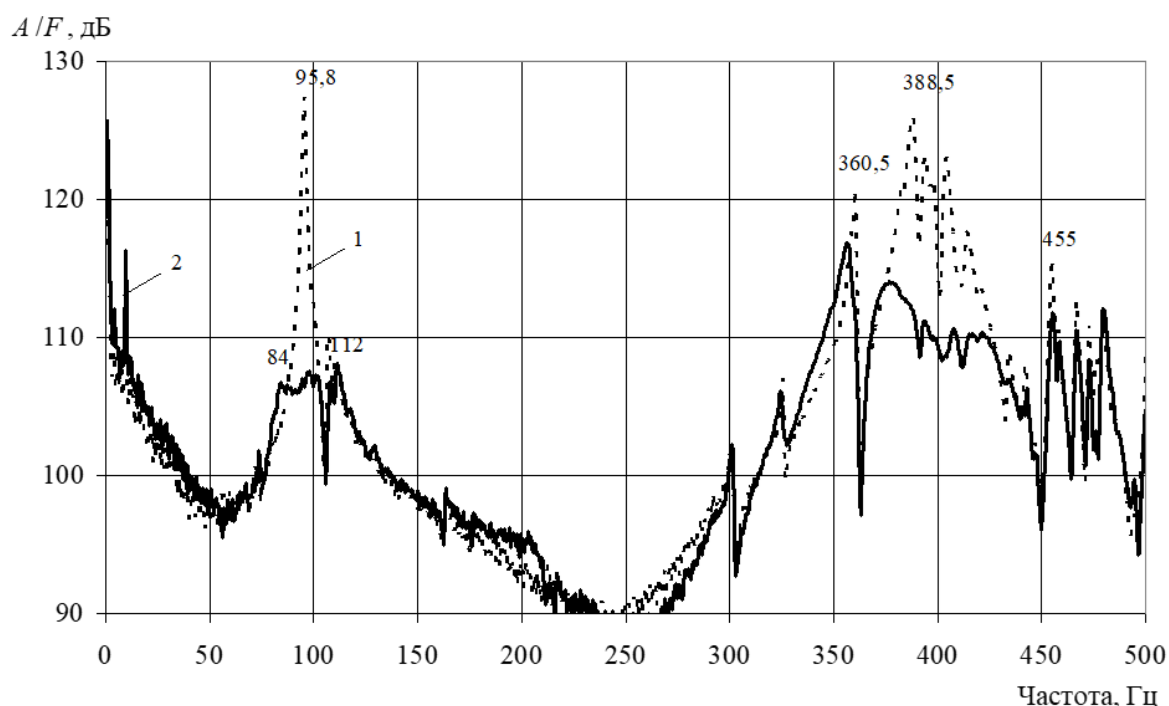


Рисунок 2 – Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии (1) и при наличии РПВ с армирующим слоем покрытия толщиной $h_A = 2 \text{ мм}$ (2)

Для достижения наибольшей эффективности уменьшения уровней A/F , дБ, на низшей резонансной частоте колебаний пластины, размеры РПВ определялись с учетом настройки на указанную частоту низшей резонансной частоты f_1 изгибных колебаний вибропоглотителя.

Оценка f_1 наиболее малогабаритных испытанных вибропоглотителей с основным элементом в виде полоски (соотношение длины пластинки к ее ширине не менее чем в 2,5 раза) осуществлялась в предположении малого влияния АВП на их инерционно-жесткостные характеристики. Вычисление частоты f_1 колебаний одинаковых участков длиной l между креплением РПВ и его короткими кромками выполнялось с использованием следующей формулы для низшей резонансной частоты колебаний полосы (стержня) с одной жестко закрепленной короткой кромкой:

$$f_1 = \alpha_1 \sqrt{\frac{B}{ml^4}}, \quad (2)$$

где α_1 – безразмерный коэффициент, зависящий от вида механического крепления полосы к демпфируемой конструкции, принимался равным 0,57; B и m – изгибная жесткость $Eh^3b/12$ и масса единицы длины ρhb полосы ($b \leq l/2,5$ – ширина полосы, E и ρ – модуль Юнга и плотность ее материала).

При длине l участка РПВ, равной расстоянию (0,16 м) между высокими подкреплениями, толщина:

$$h = \frac{f_1 l^2 \sqrt{12}}{a_1 c_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где $c_{\text{пр}}$ – скорость продольных волн в стали, 5000 м/с основной полосы ($b \leq 0,065$ м) вибропоглотителей оказалась равной $3 \cdot 10^{-3}$ м.

Были испытаны 15 РПВ, имеющих общую ($2l$) длину 0,32 м и толщину основной пластинки или полосы ($b \leq l/2,5$) $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м.

Влияние на эффективность РПВ толщины h_A армирующего слоя покрытия исследовалось с использованием двух групп вибропоглотителей со значениями h_A , равными 0,18; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мм в каждой группе. Ширина вибропоглотителей одной группы равнялась 0,065 м и удовлетворяла условию, что основная пластинка их участков является полоской, а значение ширины вибропоглотителей другой группы составляло 0,12 м и условию $b \leq l/2,5$ не удовлетворяло. Все РПВ по соотношению их общей ($2l$) длины к ширине являлись полосами.

Определенные экспериментально значения низшей резонансной частоты f_1 и коэффициента потерь η_1 колебательной энергии вибропоглотителей определялись при их установке на диск из стали, имеющий диаметр 0,41 м и толщину 40 мм. При возбуждении диска виброштыком были выполнены измерения частотного спектра переходной вибровозбудимости A/F , дБ, одной из коротких кромок основной пластинки каждого испытанного РПВ.

Анализ измеренных спектров A/F , дБ, показал, что облицовка основной пластинки РПВ вибропоглощающим покрытием с разной толщиной армирующего слоя приводит к следующим изменениям вибрационных характеристик:

- уменьшение частоты f_1 низшего резонансного максимума от значения ~ 102 Гц при $h_A = 0,18$ мм до мало отличающихся, близких к f_{11} значений ~ 93 Гц ($b = 0,065$ м) и ~ 96 Гц ($b = 0,12$ м) при больших толщинах армирующего слоя покрытия;

- последовательное снижение с повышением толщины h_A уровня резонансного максимума на величину от ~ 7 дБ при $h_A = 0,18$ мм до 20 дБ ($b = 0,065$ м) и 24 дБ ($b = 0,12$ м) при $h_A = 2,0$ мм;

- рост коэффициента потерь η_1 колебательной энергии РПВ от значения 0,01 при отсутствии покрытия до практически одинаковых значений примерно 0,05; 0,09; 0,08; 0,09 и 0,10 в обеих группах РПВ при толщинах h_A , равных 0,18; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мм соответственно;

- появление при всех значениях h_A дополнительного к $f_1 \approx f_p$, с меньшей частотой, резонансного максимума, обусловленного с высокой вероятностью взаимодействием входящих в РПВ элементов между креплением и короткими кромками; негативное влияние на вибрацию демпфируемой пластины колебаний РПВ на частоте дополнительного максимума не обнаружено.

3 Результаты измерений эффективности РПВ

Установка даже малогабаритных вибропоглотителей на демпфируемые конструкции, особенно с креплением в пучности формы колебаний гасимого резонансного максимума, приводит к изменению инерционно-жесткостных свойств конструкции и к появлению в спектрах ее вибрации двух, а иногда большего числа максимумов, смещенных от частоты гасимого. Под условной эффективностью \mathcal{E} , дБ, РПВ нами будет подразумеваться разница уровня гасимого максимума на низшей резонансной частоте f_{11} демпфируемой пластины при отсутствии на ней РПВ и уровня возникающего при его установке смещенного по частоте от f_{11} наибольшего максимума.

Зависимости эффективности вибропоглотителей первой и второй групп от толщины h_A пластинки армирующего слоя покрытия приведены на рисунке 3. Изображенные точками результаты измерений соединены линиями 1 и 2. Обращаясь к рисунку, видим существенный, от 6–7 до 14 дБ, рост практически одинаковой в группах эффективности РПВ при увеличении толщины армирующего слоя их покрытия от 0,18 до 0,5 мм. Дальнейшее повышение толщины h_A до 1; 1,5 и 2,0 мм приводит к последовательному росту эффективности до 16, 17 и 18 дБ только вибропоглотителей второй группы. Эффективность РПВ первой группы с теми же толщинами h_A оказывается практически такой же, как у вибропоглотителей со значением $h_A = 0,5$ мм. Учитывая ранее приведенные одинаковые значения коэффициента потерь η_1 вибропоглотителей с одинаковыми толщинами h_A в группах, можно предположить, что повышенная эффективность РПВ с размерами в плане $0,32 \times 0,12$ м обусловлена их большей массой, чем у вибропоглотителей первой группы с меньшей шириной, удовлетворяющей условию $b \leq l/2,5$.

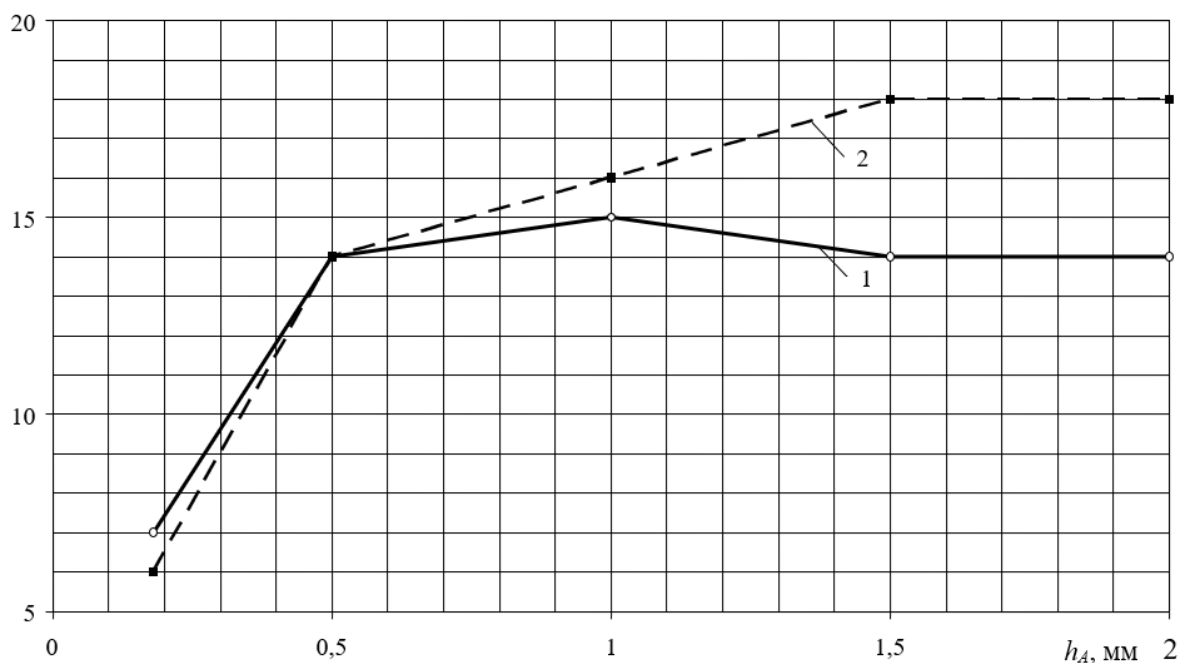


Рисунок 3 – Эффективность вибропоглотителей первой (кривая 1) и второй (кривая 2) групп в зависимости от толщины h_A армирующего слоя покрытия

Размещение на подкрепленной пластине РПВ привело к значительному увеличению в ней потерь колебательной энергии. Значения коэффициента η пластины на низшей резонансной частоте ее колебаний в сравнении со значением при их отсутствии выросли не менее чем в 5 раз. При увеличении толщины армирующего слоя h_A покрытия

от 0,18 до 2 мм значения η пластины при установке на нее РПВ первой и второй групп последовательно повысились от одинаковой величины $\sim 0,05$ до $\sim 0,1$ и $\sim 0,15$ соответственно.

Отметим, что уменьшение уровней вибрации вибропоглотителями обеих групп наблюдалось не только на низшей резонансной частоте f_{11} пластины, но и на ее более высоких резонансных частотах.

В качестве примера на рисунке 2 представлены узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины в частотном диапазоне до 500 Гц при отсутствии (1) и наличии РПВ с шириной 0,12 м и толщиной $h_A = 2$ мм. Полученная эффективность вибропоглотителя на частотах 360,5 и 388,5 Гц с наиболее высокими уровнями A/F составила примерно 3 и 14 дБ соответственно.

Заключение

Из полученных в работе результатов выделим наиболее значительные:

- представлена осуществимость снижения уровней низкочастотных дискретных составляющих в спектре вибрации пластины малогабаритным резонансным вибропоглотителем, установленным на ее подкрепляющий элемент;
- практически реализовано заметное (14–18 дБ) уменьшение уровней низшего резонансного максимума изгибных колебаний подкрепленной пластины резонансным вибропоглотителем, имеющим массу не более $\sim 2\%$;
- выявлены зависимости эффективности малогабаритного РПВ от толщины армирующего слоя покрытия на полосовом и пластинчатом основном элементе вибропоглотителя.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке малогабаритных средств вибродемпфирования, уменьшающих вибрации и шумоизлучение подкрепленных конструкций в широком частотном диапазоне, включающем их низшие резонансные частоты.

Список использованных источников

1. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций Справочник. – Л. : Судостроение, 1990. – 198, [1] с. ил.; 22. – ISBN 5-7355-0188-7.
2. Никифоров А.С. Вибропоглощение на судах. – Ленинград : Судостроение, 1979. – 184 с. ил.; 21.
3. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. Вып. 6. С. 45–46.
4. Кирпичников В.Ю., Петров А.А., Олейников А.Ю. Экспериментальные исследования эффективности пластинчатых (полосовых) вибропоглотителей // Noise Theory and Practice. 2022. V. 8, № 3, pp. 7-15.
5. Кирпичников В.Ю. Вибродемпфирование инженерных конструкций. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2025. 259 с.

References

1. Nikiforov A.S. Acoustic design of ship structures Directory. – L. : Shipbuilding, 1990. – 198, [1] p.; 22. – ISBN 5-7355-0188-7.

2. Nikiforov A.S. Vibration absorption on ships. – Leningrad: Shipbuilding, 1979. – 184 p.; 21.
3. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibro-damping properties of polymer films // Shipbuilding. 2015. № 6. pp. 45–46.
4. Kirpichnikov V.Yu., Petrov A.A., Oleinikov A.Yu. Investigations of the effectiveness of resonant plate (band) vibration dampers. Noise Theory and Practice. 2022. V. 8, № 3 pp. 7-15.
5. Kirpichnikov V.Yu.. Vibration Absorption on Ships and Engineering Structures. SPb.: Federal State Unitary Enterprise ‘State Scientific Center Krylovsky’, 2025, 259 p.